

PENGUKURAN KOEFISIEN AERODINAMIS MODEL-MODEL JEMBATAN BENTANG PANJANG

Senot Sangadji

Pengajar di Jurusan Teknik Sipil FT UNS Surakarta

Jln Ir. Sutami No.36A Surakarta 57126

Email : senot_sangadji@yahoo.com

Abstract

The objective of this research is to measure aerodynamic coefficients of long-span bridge deck models. Four models with different wind nose (fairings) will be tested using open loop wind tunnel. These replicas are made from glass fiber as major material. Flow-field dynamic similarity is maintained through non-dimensional number such as Reynolds number. Determination of aerodynamic coefficients was carried out using balance method whereas aerodynamics forces are measured by strain gages based balance apparatus. The result is presented on graphics of lift coefficient (CL), aerodynamic moment coefficient (CM) and coefficient of drag (CD) as function of angle of attack (α).

Keywords:

aerodynamic coefficients, angle of attack, balance apparatus.

PENDAHULUAN

Struktur jembatan bentang panjang dimana bagian yang langsung terkena angin berbentuk pepat (bluff/non-aerodynamic shape) memang rentan terhadap beban angin. Interaksinya dengan beban angin akan memunculkan masalah-masalah yang dapat membawanya pada situasi berbahaya dan katastrofik. Interaksi dinamik ini seringkali terjadi pada spektrum kecepatan angin yang cukup lebar. Artinya, tidak hanya pada kecepatan angin tinggi semata, bahkan pada kecepatan rendah pun, dapat muncul gejala-gejala yang merusak struktur tersebut.

Untuk dapat memecahkan permasalahan aeroelastis diatas, amat perlu untuk mengkaji karakteristik struktur yang terkena beban angin. Gelagar jembatan, dalam hal ini merupakan struktur yang paling rawan, yang karakteristiknya perlu untuk diketahui dengan seksama [11,12,15]. Salah satunya dengan mengukur koefisien aerodinamis gelagar jembatan. Karakteristik penampang, yang muncul dalam koefisien aerodinamik statik merupakan informasi pertama yang penting karena akan masuk dalam persamaan-persamaan keseimbangan analisis masalah aeroelastik lebih lanjut [15].

Tujuan utama yang hendak diraih dalam penelitian ini adalah: Mendapatkan karakteristik aerodinamis beberapa model penampang jembatan bertumpu kabel (cable supported bridge) yaitu berupa koefisien gaya angkat (CL), koefisien momen (CM) dan koefisien gaya tahan (CD) sebagai fungsi dari sudut serang (α).

Parameter pengujian utama adalah bentuk-bentuk geometri penampang gelagar jembatan yang memainkan peran sentral dalam ketidakstabilan sistem jembatan. Pengujian penampang hanya meninjau sistem aliran dua dimensi.

Determinasi Beban Angin (Gaya-Gaya Aerodinamika) Pada Jembatan Bentang Panjang

Dalam studi terhadap jembatan bentang panjang, Drybye dan Hansen (1996) menyatakan bahwa beban angin total pada gelagar jembatan dapat diperoleh dengan formulasi [1]

$$F_{\text{tot}} = F_q + F_t + F_m \dots\dots\dots [1]$$

dimana F_q menyatakan beban angin rata-rata berdasarkan perataan waktu (*time-averaged mean wind load*), F_t adalah beban angin yang berfluktuasi akibat turbulensi udara (*buffeting; wind gusts*), dan F_m mengekspresikan beban angin akibat induksi gerakan (*motion induced wind load*).

Sekalipun berbagai problem aeroelastis menuntut perhatian yang seksama, namun yang perlu untuk pertama-tama ditinjau adalah beban angin rata-rata. Karena beban atau gaya aerodinamika inilah yang seringkali terjadi maka struktur terutama harus mampu menahan gaya ini. Beban / gaya aerodinamika rata-rata, L sebagai gaya angkat, D mewakili gaya tahan dan M menyatakan momen aerodinamik, ini dapat didefinisikan persamaan [2] dan [3]:

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 B C_L(\alpha) \dots\dots\dots [2]$$

$$M = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 C_M(\alpha) \dots\dots\dots [3]$$

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 B C_D(\alpha) \dots \dots \dots [4]$$

dimana ρ adalah kerapatan udara; U menyatakan kecepatan aliran bebas; B adalah panjang karakteristik struktur yang ditinjau; C_L , C_M , C_D berturut turut adalah koefisien gaya angkat, koefisien momen dan koefisien gaya tahan.

Efek Bentuk Gelagar Pada Gaya-Gaya Aerodinamik Dan Masalah Aeroelastik

Bentuk penampang amat berpengaruh pada beban angin (gaya aerodinamik), ditunjukkan dalam koefisien-koefisien aerodinamik. Pada beban statik angin rata-rata, ini dinyatakan dalam koefisien aerodinamik statik gaya angkat, gaya tahan dan momen aerodinamik, yang untuk praktisnya disebut koefisien gaya angkat (*lift*), koefisien gaya tahan (*drag*), dan koefisien momen (*moment*).

Koefisien-koefisien ini, gambar 1, mempengaruhi besar gaya angin yang bekerja pada antarmuka gelagar-fluida. Semisal gaya tahan untuk struktur gelagar rangka akan tiga kali lebih besar dibanding struktur *box girder* karena *drag coefficient*-nya kira-kira tiga kali lebih besar. Ini terlihat dalam perbandingan Gambar 1.

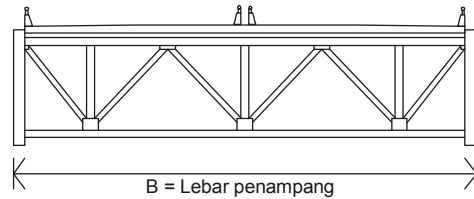
Konsep Dasar Koefisien Aerodinamis Dan Pengukurannya

Pada Gambar 2, terlihat penampang sebuah benda *bluff* dalam medan aliran udara dengan kecepatan U . Aliran akan membentuk tekanan lokal p pada benda menurut persamaan bernoulli [15];

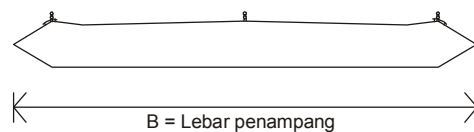
$$\frac{1}{2} \rho U^2 + p = \text{const} \dots \dots \dots [5]$$

dimana nilai *constant* terjadi sepanjang garis aliran dan U mewakili kecepatan pada garis aliran sekitar benda (sedikit diluar *boundary layer* yang terbentuk pada permukaan benda). Integrasi tekanan sepanjang permukaan benda akan menghasilkan gaya dan momen *netto* [15]. Komponen gaya yang bekerja sepanjang dan tegak lurus aliran berturut-turut disebut gaya angkat (*lift*) dan gaya hambat (*drag*). *Drag*, *lift* dan *moment* ini akan sangat dipengaruhi oleh bentuk benda dan *Reynolds Number* [10,13,15].

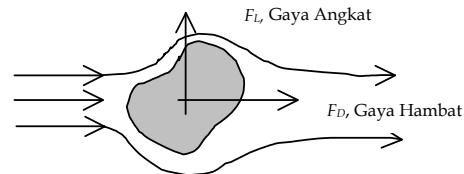
Penampang *Truss Girder*
Desain Jembatan Little Belt
Koefisien Gaya Tahan (*Drag*)
 $C_d = 0.231$
Untuk sudut datang angin
0 (nol) derajat



Penampang *streamlined box Girder*
Desain Jembatan Little Belt
Koefisien Gaya Tahan (*Drag*)
 $C_d = 0.073$
Untuk sudut datang angin
0 (nol) derajat



Gambar 1. Perbandingan koefisien gaya tahan antara struktur gelagar truss dan struktur streamline untuk usulan desain jembatan Little Belt [14].



Gambar 2. Gaya angkat dan gaya hambat pada bluff body sebarang

Benda itu sendiri dapat saja dibentuk sedemikian rupa dengan maksud untuk mengecilkan gaya hambat dan memaksimumkan gaya angkat, seperti pada sayap pesawat terbang. Tetapi pada aplikasi struktur sipil, bentuk benda sulit dibentuk dengan pendekatan khusus seperti itu. Bentuk benda biasanya telah ditetapkan oleh tujuan disain yang lain, daripada memenuhi tujuan aerodinamis murni [15]. Akan tetapi gaya-gaya aerodinamis ini tetap menjadi perhatian karena merupakan yang gaya yang harus dilawan dalam perencanaan struktur.

Pada subbagian diatas, kita telah mendapat formulasi beban aerodinamika struktur yang berada pada medan aliran angin, semisal gelagar jembatan, lihat gambar 3, terdiri dari gaya hambat (*drag*) F_D , gaya angkat (*lift*) F_L dan momen F_M per satuan panjang (persamaan 2, 3 dan 4), yang dapat

dinyatakan kembali sebagai berikut [15] :

$$F_D = q B C_D(\alpha) \dots \dots \dots [6]$$

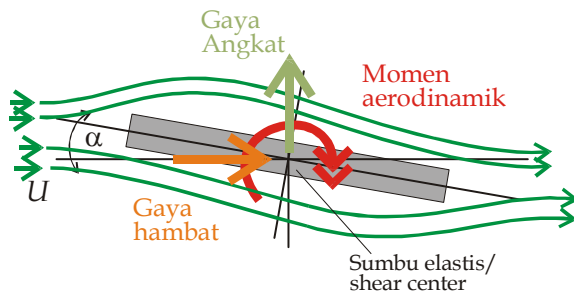
$$F_L = q B C_L(\alpha) \dots \dots \dots [7]$$

$$F_M = qB^2C_M(\alpha) \dots\dots\dots[8]$$

dimana

$$q = \frac{1}{2} \rho U^2 \dots\dots\dots[9]$$

adalah tekanan dinamik, B merupakan panjang karakteristik, ρ adalah massa jenis udara, U adalah nilai rata-rata angin referensi, C_D adalah koefisien gaya hambat, C_L adalah koefisien gaya angkat, dan C_M adalah koefisien momen.



Gambar 3. Gelagar jembatan dalam medan aliran angin

Dengan demikian koefisien-koefisien aerodinamik dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$C_D(\alpha) = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 B} \dots\dots\dots[10]$$

$$C_L(\alpha) = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 B} \dots\dots\dots[11]$$

$$C_M(\alpha) = \frac{F_M}{\frac{1}{2} \rho U^2 B^2} \dots\dots\dots[12]$$

Sesungguhnya melihat pada persamaan diatas maka kita dapat menarik suatu simpulan. Jika kita dapat mengukur gaya-gaya yang bekerja pada penampang pada suatu uji terowongan angin, dan besaran lain dapat kita ketahui atau kita kontrol maka sebenarnya koefisien aerodinamis bukan sesuatu yang sulit dicari.

Namun, dalam dunia aerodinamika eksperimental, dikenal beberapa variasi dan metode untuk penentuan koefisien aerodinamika. Pertama adalah mencari profil koefisien tekanan (*pressure coefficient*) sepanjang *interface* struktur, kemudian profil ini di integrasi dengan batas permukaan untuk mendapat gaya dan momen [1]. *Pressure coefficient* diperoleh dengan menempatkan beberapa *tube* yang dihubungkan dengan tabung-tabung tekanan [1,8]. Cara ini amat efisien untuk penampang dengan permukaan yang mulus dan bentuknya aerodinamis [4].

Profil model jembatan sering harus mengikutsertakan beberapa struktur utilitas pada jembatan asli yang memang akan mempengaruhi aliran [3,6,14]. Pada profil seperti ini aliran akan mengalami banyak separasi [1,8] yang mengakibatkan sulit diperoleh profil dengan koefisien tekanan yang sinambung. Dengan demikian penentuan koefisien penampang haruslah menggunakan metode lain.

Kita ketahui pula bahwa koefisien-koefisien ini merupakan fungsi dari rotasi penampang terhadap sumbu bentang struktur, sering disebut sudut serang (*angle of attack*). Ini dapat dimengerti karena setiap perubahan posisi sudut serang akan mengubah pola aliran dan jelas mengubah besar gaya.

Oleh karenanya pengukuran gaya pada uji ini akan mengikuti suatu variasi perubahan sudut-sudut. Koefisien-koefisien kemudian, untuk satu jenis penampang dek diplot dalam grafik sebagai fungsi dari sudut serang (α). Dengan mengetahui jejak kurva koefisien-koefisien aerodinamik terhadap sudut serang, maka kita dapat mengetahui laju perubahan koefisien tersebut terhadap sudut serang. Atau yang dikenal sebagai turunan pertama koefisien terhadap sudut serang. Besaran yang terakhir ini akan membantu untuk proses kuantifikasi beban aerodinamis masalah *buffet*, penyelesaian masalah divergen dan *galloping*[15].

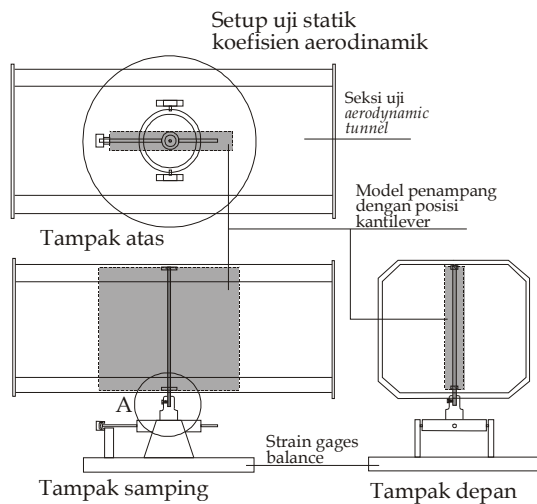
METODE

Setup Uji Koefisien Aerodinamik

Masalah yang dihadapi dalam menentukan koefisien diatas, adalah bagaimana mengukur besar gaya yang bekerja pada model gelagar jembatan.

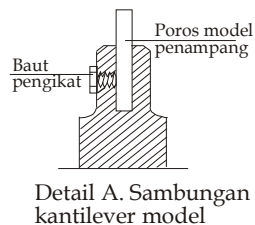
Cara yang efektif adalah dengan mengukur reaksi yang ditimbulkannya. Cara ini dikenal dengan metode penyeimbangan atau *balancement*. Reaksi bisa diindra dengan mengetahui perpindahan yang terjadi ketika model berada dalam medan aliran udara terowongan angin. Penginderaan perpindahan sendiri dapat dilakukan dengan menggunakan strain gage yang terkenal handal.

Setup pengujian dapat dibuat dengan sederhana seperti terlihat pada Gambar 4:



Gambar 4. Setup uji koefisien aerodinamik dengan posisi model penampang kantilever pada *strain gages balance*.

Model gelagar jembatan dipasang pada seksi uji terowongan angin, dengan posisi tegak, (lihat gambar 4). Poros model disambungkan ke dalam *strain gages balance*, sedemikian rupa sehingga model berposisi sebagai kantilever. Sambungan poros silinder model dengan *apparatus balancement* terlihat pada Gambar 5.



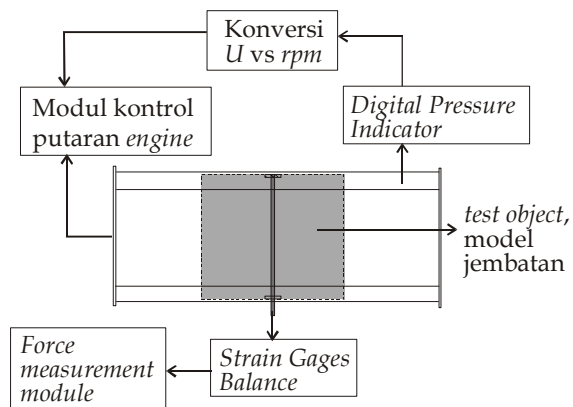
Gambar 5. Tumpuan kantilever poros model gelagar pada *strain gages balances*.

Perhatian lebih perlu diberikan pada bentuk sambungan ini. Baut pengikat harus cukup kuat. Tepat pada perletakan baut pada poros silinder model dibuat sedikit takikan. Ini dilakukan untuk menjamin tersedianya kondisi tumpuan kaku sesempurna mungkin. Salah satunya menahan model agar tidak terkena torsi, terutama karena *slip* yang terjadi pada daerah pertemuan ujung baut dengan silinder poros model.

Apparatus balance ini bekerjasama dengan beberapa instrumen lain untuk melakukan pengukuran gaya-gaya aerodinamik dengan konfigurasi seperti pada gambar 6.

Dalam konfigurasi diatas terdapat tiga bagian besar yang menyusunnya. Pertama adalah *test object*,

kedua adalah *aerodynamic wind tunnel* dan terakhir *force measurement system*.



Gambar 6. Diagram setup pengujian aerodinamik statik untuk menentukan koefisien-koefisien aerodinamik

Test object berupa model jembatan yang memiliki kesamaan geometrik terhadap purwarupa, dengan rasio tertentu.

Aerodynamic wind tunnel yang digunakan bertipe *open loop* dengan seksi uji yang tertutup (lihat gambar 7). *Wind Tunnel Test Section* berpenampang 40 cm x 40 cm segi delapan dengan panjang *test section* 1.5 m. Mesin yang digunakan adalah motor listrik yang dilengkapi dengan 10 bilah *axial fan* dan mempunyai kecepatan operasional maksimum sebesar 1500 RPM, juga diperlengkapi dengan modul kontrol digital yang digunakan untuk memasukkan *input RPM* pada mesin *wind tunnel*. Kecepatan udara maksimum mencapai 30 m/s.

Test section terdiri dari dua bagian yang sama panjang. Bagian pertama terletak di depan dimaksudkan sebagai stabilisator aliran masuk dari *contraction cone* agar memiliki distribusi kecepatan dan *alignment* aliran yang seragam. Bagian *test section*-nya sendiri berada di belakang bagian pertama. Stabilisasi aliran juga dilakukan dengan penambahan *honey comb* di bagian depan *cone* dan penambahan *screen* tepat di bagian depan *test section*.

Pengukuran tekanan dinamik, untuk mendapatkan harga kecepatan udara didalam seksi uji *wind tunnel*, dilakukan dengan DPI (*digital pressure indicator*) dengan ketelitian hingga 1 pascal. Pengukuran ini dilakukan dengan dua maksud sekaligus; pertama, kalibrasi harga kecepatan angin dengan relasi terhadap kecepatan putaran mesin (*engine rpm*). Sedang yang kedua meninjau kualitas aliran yang terbentuk di dalam seksi uji; untuk mengetahui kelurusan aliran, tingkat turbulensi

aliran dan pertumbuhan lapisan batas yang terjadi di sepanjang seksi uji.

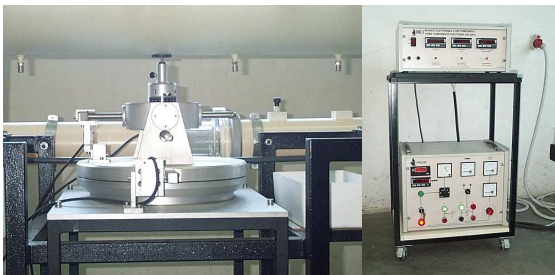


Gambar 7. Open loop aerodynamic tunnel yang digunakan dan seksi ujinya.

Force measurement system memiliki dua instrumen penting; *strain gages balance* dan modul pengukuran gaya. *Balance*, memakai *strain-gage* sebagai sensor gaya merupakan pengembangan lebih lanjut dari sistem *three-balanced component* yang memakai timbangan. Ketiga jenis gaya aerodinamik (*lift*, *drag* dan *moment*) yang terjadi pada model tes diukur dengan memakai sebuah *platform* yang bergerak bebas pada ketiga sumbu.

Strain-gage adalah sejenis tahanan yang mempunyai suatu sifat inheren dimana akibat deformasi yang dialaminya akan memberikan besar tahanan yang berbeda-beda. Dengan menggunakan susunan *Wheatstone Bridge* yang kemudian di tempatkan pada sebetuk *load cell*, *strain gage* ini dipakai untuk mengukur gaya-gaya yang timbul, dari deformasi yang dialami *load cell* tersebut.

Modul pengukuran gaya akan menerima sinyal dari *strain gages balance* dan akan mengolah sinyal tersebut dan menampilkannya secara langsung sebagai informasi gaya angkat, gaya hambat dan momen aerodinamika. Ketiga gaya ini akan nampak pada panel-panel *digital* modul pengukur, gambar 8.



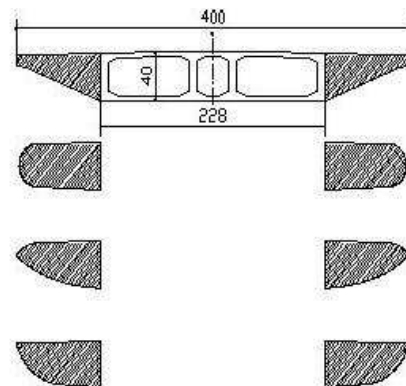
Gambar 8. *Strain gages balance* dan modul pengukuran gaya.

Strain gages balance bekerja pada tiga sumbu, searah aliran untuk mengukur *drag*, tegak lurus aliran untuk *lift* dan torsional pada sumbu vertikalnya untuk mengukur momen aerodinamik. Pengukuran gaya untuk model jembatan dilakukan pada saat putaran mesin mencapai kondisi stabil, diharapkan pula aliran sudah stabil pula. Setelah terukur, model diputar dengan sumbu rotasi porosnya untuk variasi sudut serang tertentu yang diinginkan.

Model Fisik Penampang Gelagar Jembatan

Model fisik yang direncanakan, dibuat dan diuji pada tesis ini adalah termasuk dalam kelompok replika skala kecil (*small scale replica*). Model ini ditujukan untuk mewakili bentuk penampang dari bentang utama pada jembatan bentang panjang yang dikaji kelayakannya untuk jembatan selat sunda (menghubungkan sumatera dan jawa) dengan dimensi dasar; lebar penampang 40 m, tebal rata-rata gelagar *box girder* 4 m dan panjang bentang utama 1000 m. Penampang hasil studi kelayakan ini [3], mengadaptasi profil jembatan Normandy di Perancis.

Dari profil jembatan ini kemudian dikembangkan beberapa profil baru yang diduga memberikan kinerja yang lebih baik. Modifikasi dilakukan pada *wind fairing* (*wind nose*). Jika profil awal memiliki *fairing* yang lurus berbentuk segitiga konvensional, maka *wind fairing* baru dibuat dengan profil lengkung. Gambar 9, menunjukkan profil model 1 (awal) dan modifikasi *fairing* yang dilakukan.



Gambar 9. Profil model fisik yang diuji dan modifikasi *fairing*.

Model ini direncanakan memiliki skala 1:100 dengan purwarupa-nya sehingga lebar model adalah 400 mm. Dan memiliki *section length* 395 mm. Panjang seksi penampang ini dibuat untuk memenuhi batas seksi uji *wind tunnel* yang hanya memiliki ruang selebar 400 x 400 mm. Batasan ini

membuat aspek rasio panjang dengan lebar model kurang dari 1 hingga *blockage ratio* mencapai 6%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengukuran Karakteristik Aerodinamik Penampang Jembatan

Pengujian dilakukan pada Reynolds number (Re) \approx 500.000, kerapatan udara di daerah Bandung berkisar antara 0.925-0.935 kg/m³ dan kecepatan aliran udara yang digunakan berkisar 25-26 m/s. Data-data pengujian untuk setiap model disajikan pada tabel 1. Kurva karakteristik aerodinamik model 1 ditampilkan pada gambar 10, model 2 pada gambar 11, model 3 pada gambar 12 dan model 4 pada gambar 13. Pada pengukuran gaya aerodinamik, diambil suatu rentang harga (batas atas dan bawah) untuk satu sudut serang dan kecepatan tertentu, hal ini terlihat pada gambar tersebut. Perhitungan selanjutnya didasarkan pada nilai tengah rentang tersebut.

Tabel 1. Parameter-parameter pengujian yang dilakukan

Parameter	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
A_{real} (m ²)	0.16	0.16	0.16	0.16
A_{eff} (m ²)	0.158	0.158	0.158	0.158
RPM	1200	1200	1200	1200
T (°C)	25	25	25	25
β (%)	62.5	62.5	62.5	62.5
ρ (kg/m ³)	0.93	0.93	0.93	0.93
μ (N.s/m ²)	1.836E-05	1.836E-05	1.836E-05	1.836E-05
Re	530421	531552	526965	534587
U (m/s)	26.11	26.23	26.01	26.31

Dengan faktor koreksi yang besar - *solid blockage* mencapai 6.4% pada model 2 - dan keterbatasan kemampuan pengukuran gaya pada *Strain Gage Balances* membuat pengukuran gaya-gaya aerodinamika hanya dilakukan pada rentang sudut serang yang sempit - hanya -3.1° s/d 2.0° pada model 2.

Pengukuran *Lift* dan Momen dilakukan secara simultan, pengukuran *Drag* dilakukan terpisah, karena kerusakan modul pengukur *drag* pada *Strain Gage Balances* tidak dapat diperbaiki hingga eksperimen ini berakhir. Hasil pengukuran *Drag* kemudian didapatkan dengan memindah modul pengukur lift ke modul *Drag*. Pengukuran *Drag* dilakukan pada rentang sudut yang sama dengan rentang pengukuran *Lift* dan Momen yang lebih dahulu dilakukan.

Empat model yang diuji, secara inheren tidak stabil karena $\delta C_M / \delta \alpha$ yang dimiliki berharga positif, harga

gradien momen terkecil terlihat pada pengujian model 3. Semua hasil perhitungan $\delta C_M / \delta \alpha$ berharga lebih besar dari gradien momen terhadap sudut serang yang dimiliki pelat tipis teoretis dalam aliran potensial.

Pada model 4, bila dilihat bentuk profilnya, mempunyai kemiripan dengan model 1. Tetapi hasil keduanya tidak semirip profilnya. Begitu juga dengan model 3 dan model 2. Secara global memang terlihat kemiripan diantara kedua kelompok ini. Model 1 dan model 4 memiliki gradien koefisien lift yang rendah dibandingkan dengan model 3 dan model 2.

Empat model gelagar jembatan ini menunjukkan hasil uji yang tipikal untuk jenis profilnya. Tabel di bawah ini memberikan perbandingan karakteristik aerodinamika model gelagar jembatan dengan profil teoretis yaitu pelat tipis dalam aliran potensial.

Tabel 2. Hasil regresi koefisien lift dan momen terhadap α sebelum dan sesudah koreksi

	Teori Pelat Tipis	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Camber	simetris / -	-	simetris	-	-
$C_L _{\alpha=0}$	0 / -	-0.4139	-0.0961	-0.4553	-0.2311
$C_M _{\alpha=0}$	0 / +	0.0897	0.0058	0.0793	0.0260
$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha}$	0.10966/ ^o	0.0673/ ^o	0.0823/ ^o	0.0777/ ^o	0.0517/ ^o
$\frac{\partial C_M}{\partial \alpha}$	0.02742/ ^o	0.0452/ ^o	0.0454/ ^o	0.0449/ ^o	0.0479/ ^o

Model 1

Model gelagar ini memberikan *solid blockage* yang paling kecil dikarenakan volumenya yang paling kecil dibanding ketiga model gelagar jembatan yang lain.

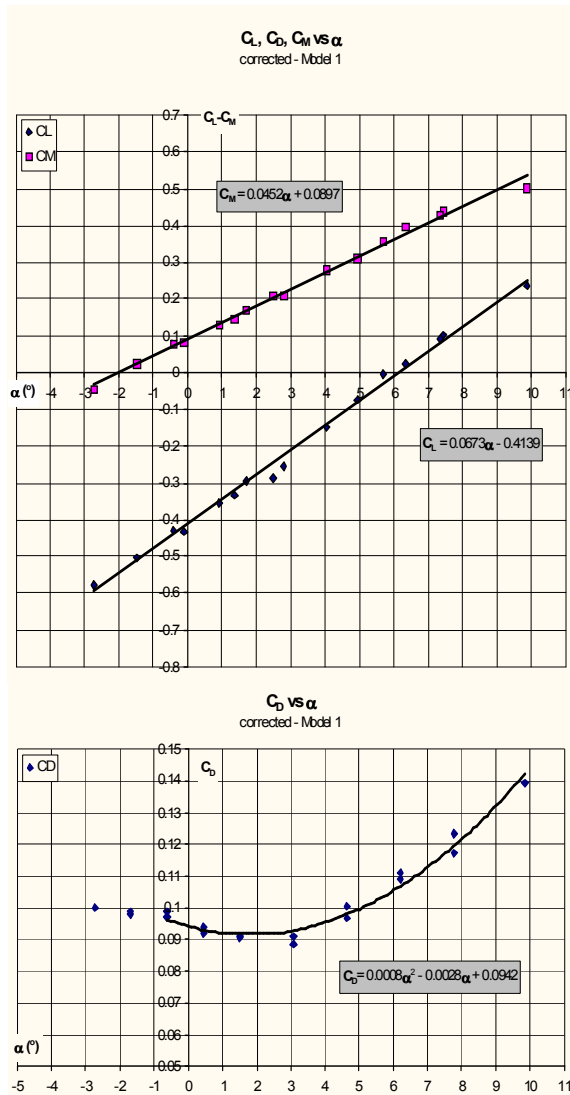
Hasil regresi C_L , C_D , C_M vs α untuk profil model 1 ini adalah sebagai berikut :

Terkoreksi	
$C_L = 0.0673\alpha - 0.4139$	
$C_M = 0.0452\alpha + 0.0897$	
$C_D = 0.0008\alpha^2 + 0.0028\alpha + 0.0942$	

Rentang pengukuran berkisar dari sudut serang - 2.3° hingga 4.5°. Pengukuran lebih lanjut sulit dilakukan dengan adanya vibrasi pada model. Amplitudo mencapai 1 cm membuat interval gaya aerodinamika yang diukur menjadi tidak akurat karena inersia model gelagar jembatan menjadi

begitu dominan. Hal ini terlihat pada sudut serang negatif terutama pada $\alpha = -2.3^\circ$, sehingga harus menurunkan putaran mesin menjadi 1150 dari RPM 1200 sebelumnya. Daerah pada sudut serang positif relatif lebih stabil.

Dibandingkan dengan 3 model yang lain, model 1 ini memiliki permukaan bawah paling tidak *smooth*. Beberapa akibat yang dapat dilihat adalah rentang pengukuran pada sudut serang negatif tidak dilakukan pada sudut serang lebih kecil dari -2.3° .



Gambar 10. Grafik persamaan regresi koefisien aerodinamis model satu setelah koreksi.

Model 2

Harga C_{D-base} paling besar terjadi pada model ini, yang merupakan model yang harga faktor koreksi *solid blokage* paling besar.

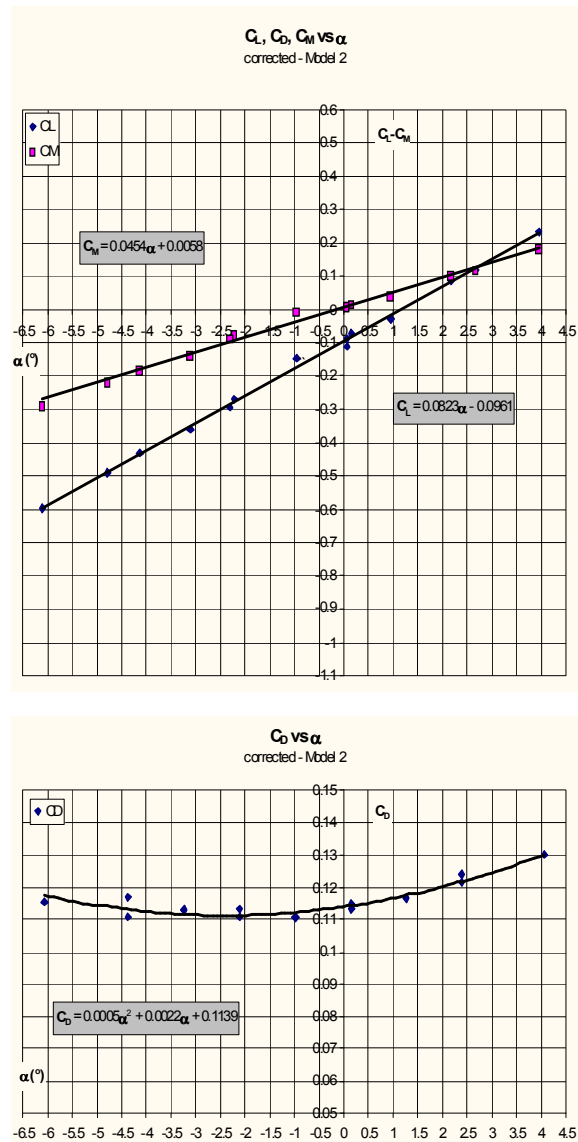
Hasil regresi C_L, C_D, C_M vs α untuk profil model 2 ini adalah sebagai berikut :

Terkoreksi

$$C_L = 0.0823\alpha - 0.0961$$

$$C_M = 0.0454\alpha + 0.0058$$

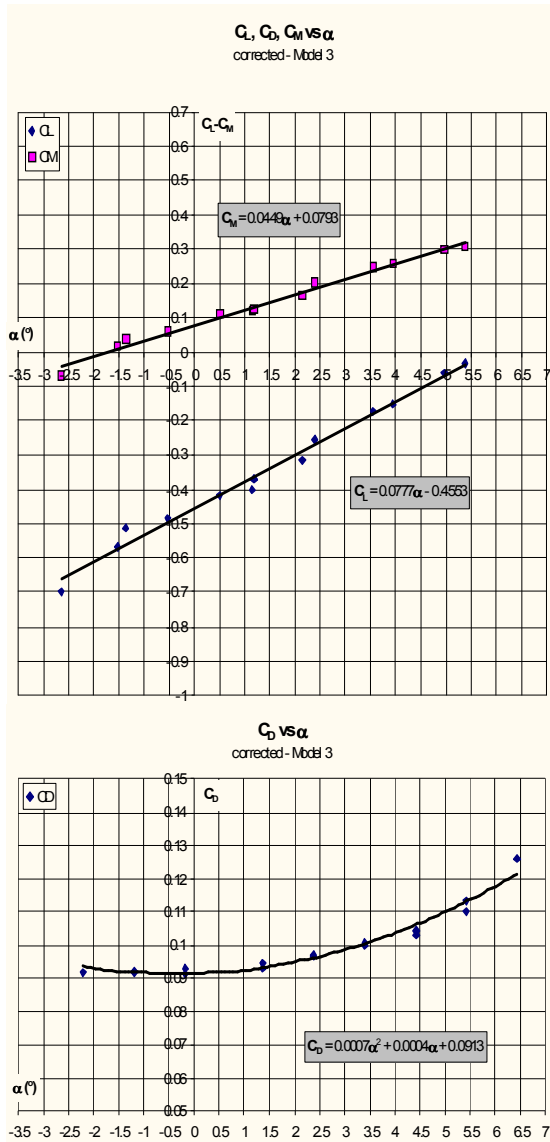
$$C_D = 0.0005\alpha^2 + 0.0022\alpha + 0.1139$$



Gambar 11. Grafik persamaan regresi koefisien aerodinamis model 2 setelah koreksi.

Rentang pengukuran bahkan lebih sempit dibandingkan dengan model 1, hanya pada rentang sudut -3.0° hingga 2.0° . Sempitnya rentang pengukuran juga dikarenakan keterbatasan *Strain Gage Balances* dan besarnya vibrasi yang terjadi.

Model ini paling “*bluff*” dibandingkan dengan ketiga model gelagar jembatan lainnya, sehingga pelepasan aliran sangat cepat terjadi.



Gambar 12. Grafik persamaan regresi koefisien aerodinamis model 3 setelah koreksi.

Model 3

Bentuk profil model 3 ini, terlihat paling mirip bentuk airfoil (potongan sayap pesawat terbang) daripada 3 model yang lain. Dari hasil perhitungan didapatkan harga $\delta C_L / \delta \alpha$ terbesar kedua, dibawah model 2.

Hasil regresi C_L, C_D, C_M vs α untuk profil model 3 ini adalah sebagai berikut :

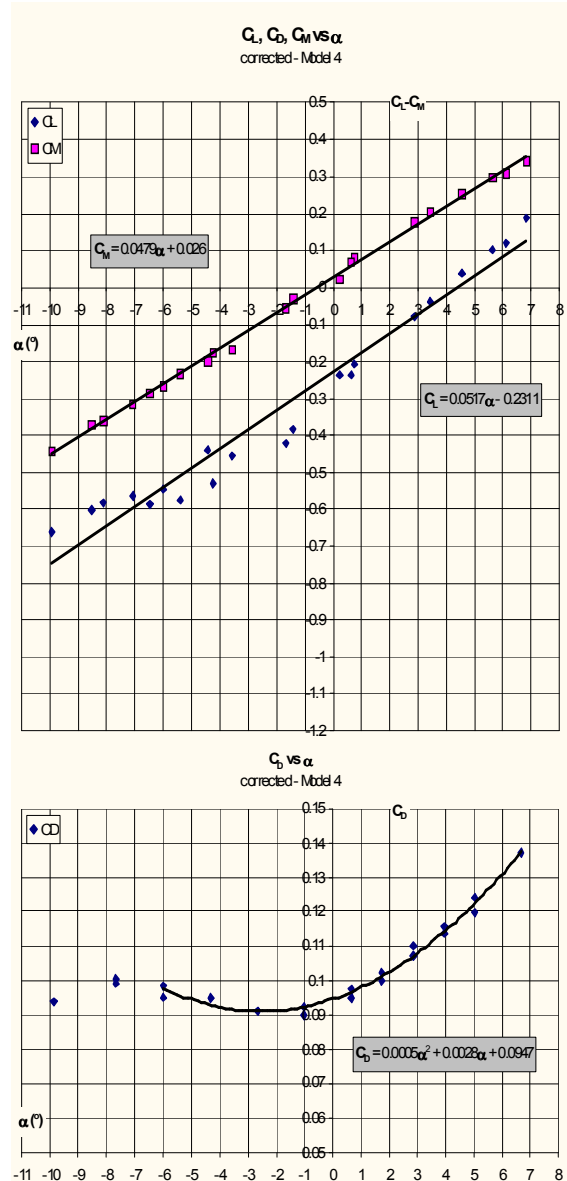
Terkoreksi

$$C_L = 0.0777\alpha - 0.4553$$

$$C_M = 0.0449\alpha + 0.0793$$

$$C_D = 0.0007\alpha^2 + 0.0004\alpha + 0.0913$$

Rentang pengukuran yang bisa dilakukan sangat sempit. Dari -2.0° hingga 2.3° rentang pengukuran hanya 4.3°. Sempitnya rentang pengukuran diduga disebabkan lebih karena pola pelepasan aliran yang terjadi.



Gambar 13. Grafik persamaan regresi koefisien aerodinamis model 4 setelah koreksi.

Model 4

Model ini memberikan harga $\delta C_L / \delta \alpha$ terendah hanya 0.0517/° dan harga $\delta C_M / \delta \alpha$ tertinggi mencapai 0.0479/°.

Hasil regresi C_L , C_D , C_M vs α untuk profil model 4 ini adalah sebagai berikut :

Terkoreksi

$$C_L = 0.0517\alpha - 0.2311$$

$$C_M = 0.0479\alpha + 0.026$$

$$C_D = 0.0005\alpha^2 + 0.0028\alpha + 0.0947$$

Pada pengukuran *drag* terlihat bahwa pada sudut yang negatif dan besar harga koefisien *drag* turun kembali. Hal ini diduga berkaitan dengan *reattachment* aliran pada bagian bawah model gelagar jembatan.

Pengukuran karakteristik aerodinamika sebuah jembatan, pada kenyataannya merupakan hal yang kompleks; kondisi atmosferik, aspek tiga dimensi, ketidakmampuan dalam memenuhi parameter similiaritas seperti bilangan Reynolds, aspek detail seperti bilangan Reynolds lokal pada daerah aliran di belakang pagar atau tiang lampu misalnya, dan keterkaitannya dalam fenomena-fenomena dinamik seperti *buffeting* membuat perlunya suatu bentuk kajian aerodinamis yang lebih khusus dalam bidang ini. Perlu adanya kajian yang lebih mendalam khususnya dalam masalah aerodinamika turbulen.

Model yang dibangun juga harus memenuhi persyaratan untuk merepresentasikan kondisi real sejauh mungkin, kajian terhadap model yang non-aerofoil menjadi bagian penting. Dalam pengujian ini harga faktor koreksi yang dipakai merupakan faktor koreksi yang diperuntukkan bagi *aerofoil*. Studi bagi model yang berukuran relatif besar akan sangat terasa berarti bagi penyelidikan lanjutan pada detail model, seperti masalah bilangan Reynolds lokal.

Harga bilangan Reynolds yang dapat dicapai pada penelitian ini jauh di bawah bilangan Reynolds yang sesungguhnya terjadi, yang diperkirakan memberikan bilangan Reynolds sebesar $9,2E+07$.

Akibat pola aliran yang terbentuk, model selalu mengalami vibrasi yang besar, sangat terasa pada sudut serang α yang tinggi. Massa model uji rata-rata seberat 1.65 kg, sementara rentang pengukuran gaya pada *strain gage balances* yang digunakan 7 kg, sehingga pada sudut serang tinggi yang dominan adalah gaya inersia model itu sendiri. Ada empat pemecahan untuk hal ini, yang pertama adalah memakai model yang lebih ringan, kelemahannya adalah bila model yang diuji pada eksperimen aerodinamik statis juga merupakan model aeroelastik yang membutuhkan kompromi dengan similiaritas dalam hal inersia dan distribusi massa.

Yang kedua model yang lebih kecil, kelemahannya pada pemenuhan parameter similiaritas geometri, sulit dilakukan. Yang ketiga setup pengujian yang lebih rigid. Yang keempat memakai terowongan angin dengan *three balances component* yang lebih besar dengan redaman massa yang juga lebih besar.

SIMPULAN

Setelah mengalami beberapa perubahan konfigurasi, Terowongan Angin Politeknik Bandung yang digunakan dalam penelitian ini dapat dikatakan mencapai kualitas yang cukup baik. Efisiensi aliran meningkat 16.7% terlihat pada kenaikan gradien kecepatan aliran terhadap putaran mesin. Untuk kecepatan 25 m/s, penurunan putaran mesin mencapai 23.8 % dari RPM 1300 menjadi RPM 1050. Namun demikian studi kelayakan yang lebih komprehensif dan mendetil perlu dilakukan pada terowongan angin ini.

Pengukuran gaya aerodinamika dengan *Strain gage balances* menunjukkan linearitas dan tingkat kepercayaan yang tinggi. Hal ini juga terlihat dari hasil kalibrasi untuk komponen lift dan drag. Penggunaan *Strain gage balances* mempermudah pengukuran gaya-gaya aerodinamika dan merupakan solusi paling cepat dalam jenis penelitian ini.

Hasil pengukuran gaya-gaya aerodinamika untuk model-model gelagar ini memberikan harga koefisien-koefisien karakteristik aerodinamika yang tipikal, setelah mengalami faktor koreksi. Hasil ini juga dibandingkan dengan pelat tipis teoritis dan mempunyai perbandingan yang wajar. Kesulitan dalam mendapatkan hasil pengukuran adalah karena keterbatasan rentang pengukuran gaya pada *strain gage balances* dan ukuran model yang relatif besar. Massa model yang besar membuat inersianya begitu dominan bila terjadi vibrasi pada model.

Faktor koreksi yang diterapkan merupakan faktor koreksi hasil dari teori pelat tipis dalam aliran potensial, tetapi faktor koreksi ini memberikan hasil yang cukup baik. Perlu studi khusus mengenai faktor-faktor koreksi untuk profil non aerofoil.

Dari hasil-hasil $C_{M\alpha}$ yang diperoleh, secara kualitatif bentuk jembatan no 4 lebih sensitive terhadap gejala divergensi

REKOMENDASI

1. Validasi dan pengujian karakteristik terowongan angin merupakan keharusan. Pengujian ini antara lain meliputi horizontal bouyancy, karakteristik lapisan batas di dalam terowongan

- angin, turbulence factor dan turbulence level didalamnya.
2. Pengujian model perlu dibandingkan dengan pengujian dalam aliran yang lebih tinggi bilangan Reynoldnya atau dalam rezim aliran yang lebih turbulen. Untuk dilihat seberapa besar perbedaan yang muncul.
 3. Studi mengenai *model scaling* perlu diperhatikan dalam penelitian yang bersifat eksperimental. Masalah bilangan Reynolds lokal merupakan hal yang penting dalam *model scaling*.

REFERENSI

- Anderson, John D. Jr.; "Fundamentals of Aerodynamics"; 2nd Ed., McGraw-Hill, 1991.
- Anonim, ; "Laporan Pengujian Model Aeroelastik Jembatan Cikapayang di Laboratorium BLWT Ontario Canada", Report, Laboratorium Getaran dan Pengendalian, Jurusan Teknik Penerbangan ITB, 1998.
- Besari, M. Sahari, ; "Teknologi Jembatan Cancang dan Gantung: Analisis Struktur dan Stabilitas Aerodinamik", Unpublished Paper, Institut Teknologi Bandung, 1997.
- Bessie, Ronald., "Kaji Aerodinamika Eksperimental Model gelagar Jembatan Selat Sunda", Skripsi Teknik Penerbangan ITB, 2001.
- Bisplinghoff, Raymond L. ; Holt, Ashley and Halfman, Robert L.; "Aeroelasticity", Addison-Wesley Publishing Company Inc., Reading, 1955.
- Dyrbye, Claes and Hansen, Svend Ole; "Wind Loads on Structures", John Wiley & Sons, Singapore, 1997.
- Fung, Y.C.; "An Introduction to the Theory of Aeroelasticity", Dover Publication Inc., New York, 1969
- Gerhart, Philip M., Gross, Richard J., Hochstein John I., "Fundamentals of Fluid Dynamics", 2nd ed.,Addison-Wesley, 1985.
- Gimsing, Niels J., ; "Cable Supported Bridges: Concept and Design", John Wiley & Sons, 1983.
- Hjorth-Hansen, E., ; "Section Model Tests, Proceedings of the 1st. International Symposium on Aerodynamics of Large Bridges", A.A. Balkema, Copenhagen, 1992
- Huston, Dryver R., Bosch, Harold S.; "Aerodynamic Design of Highway Structures"; Dec, 14th 2000;